

# 铁电薄膜电疲劳研究进展\*

陈志武<sup>1</sup>, 程璇<sup>2</sup>, 张颖<sup>1</sup>

(1. 厦门大学 材料科学与工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 化学系, 固体表面物理化学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 铁电薄膜在交变电场下发生电疲劳现象是影响其商业应用的主要障碍,也是目前国内外研究的热点。本文从铁电薄膜电疲劳的影响因素、疲劳机理和消除疲劳的措施出发综述了近年来国内外在铁电薄膜电疲劳研究方面取得的进展。

**关键词:** 铁电薄膜; 电疲劳; 畴变

**中图分类号:** O484.1 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-9731(2003)05-0500-05

## 1 引言

铁电薄膜由于具有优良的压电、铁电、介电、热释电、光电、声光及非线性光学性能而受到高度重视,在随机存取存储器、微执行器、微传感器、光开关、光调制器和高容量电容器等器件中均有着重要的应用。但是在巨量的畴变循环下,铁电薄膜材料极易出现电疲劳。典型特征为随着电场循环次数的增加,微观可转动畴减少,宏观剩余极化强度的降低<sup>[1]</sup>。例如采用金属电极 Pt,在  $10^6$  次开关后, PZT 铁电薄膜的  $P_r$  已下降为原值的 75%,在循环  $10^8$  次后,  $P_r$  已降为原值的 17%<sup>[2]</sup>,而实际应用要求无疲劳开关次数为  $10^{12}$  次以上<sup>[1]</sup>。疲劳问题严重限制了铁电薄膜使用的商业化进程,研究铁电薄膜电疲劳的起源,并且寻求消除疲劳的措施,在理论和实际应用方面都具有重要的意义。本文从铁电薄膜的电疲劳影响因素、疲劳机理和消除疲劳的措施出发,综述了近年来国内外在铁电薄膜电疲劳研究方面取得的进展。

## 2 铁电薄膜电疲劳的影响因素

对于影响铁电薄膜电疲劳的因素,人们进行了广泛的研究,但是也得出不少相互矛盾的结论,综合以往的研究成果,认为以下因素对电疲劳有影响。

### 2.1 电极材料和铁电薄膜的成分

传统的镀有 Pt 电极 Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> 电容器通常在循环  $10^4 \sim 10^7$  之间就出现电疲劳现象,而采用导电氧化物电极如 RuO<sub>2</sub>、IrO<sub>2</sub>、SrRuO<sub>3</sub> 却可以将开始出现疲劳的循环次数提高为  $10^9 \sim 10^{12}$  次,一面电极材料采用 Pt 而另一面采用氧化物或两面电极分别采用其它金属和氧化物也可收到相同的效果,据报道 PbYb<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> 薄膜在其一面镀上 Pt 电极,而在另一面镀上 RuO<sub>2</sub> 氧化物电极后,其抗疲劳性能得到很大的改善<sup>[2~5]</sup>。改变铁电薄膜材料本身也将改变铁电薄膜的抗疲劳性能,如采用 sol-gel 方法制备的含铋层状钙钛矿化合物 Bi<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> 薄膜在循环  $10^8$  次后极化无任何变化,循环  $10^{10}$  次后极化下降

为 13%<sup>[6]</sup>。日本松下公司和美国 Symetrix 公司联合研制的 Sr-Bi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> 层状钙钛矿氧化物在循环  $5 \times 10^{12}$  次后,剩余极化仅降低 5%<sup>[7]</sup>。

### 2.2 电场强度、频率

对于 Pt/PZT/Pt 系统而言,不同的小组研究了电场强度对其疲劳性能的影响,得到了截然不同的结论:Pawlaczyk<sup>[8]</sup>等人认为,疲劳速率与所采用的交流电场强度无关,如图 1(a)所示;而 Mihara<sup>[9]</sup>等人却认为电场强度越高,疲劳速率越快,如图 1(b)所示。Ramesh<sup>[10]</sup>研究了电场频率对 Au/PZT/YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 疲劳性能的影响,发现采用的电场频率越慢,薄膜的疲劳速率越快,但 Pawlaczyk<sup>[8]</sup>等人研究却发现,对于 Pt/PZT/Pt 而言,电场频率对疲劳性能没有影响。

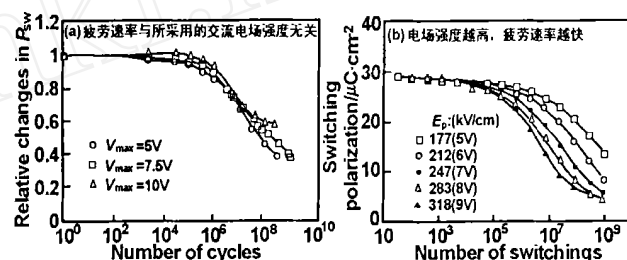


图 1 铁电薄膜电疲劳与电场强度的关系

Fig 1 Polarization fatigue profiles for different driving voltage amplitudes

### 2.3 薄膜厚度

人们发现薄膜厚度与其疲劳性能有很大关系。Lee<sup>[3]</sup>比较了 Pt/PZT/Pt、RuO<sub>2</sub>/PZT/RuO<sub>2</sub>、Pt/SBT/Pt 3 种体系,发现第一种体系很容易疲劳,而其小信号介电常数强烈的依赖于薄膜厚度。但对于后两者而言,厚度对介电系数没有影响,其抗疲劳性能也越好。与其相类似,Haertling<sup>[11]</sup>研究发现,对于 Pt/PZT/Pt 而言,薄膜厚度对其矫顽电场有很大影响(如图 2(a)所示),其疲劳速率也越快,而对于 (La, Sr)COO<sub>3</sub>/PZT/(La, Sr)COO<sub>3</sub> 和 Pt/SBT/Pt 来说,薄膜厚度对矫顽场强的影响不大<sup>[12]</sup>(如图 2(b)所示),铁电薄膜的抗疲劳性能也越好。

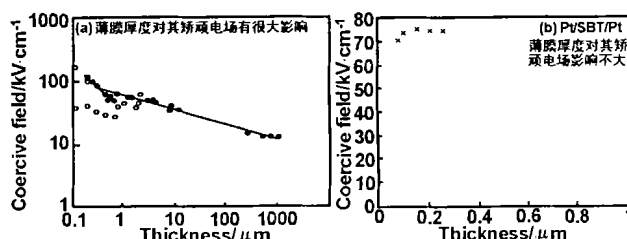


图 2 薄膜厚度与矫顽场强的关系

Fig 2 Dependence of coercive field on the film thickness

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(19672053);国家教委博士学科点专项基金资助项目(96061305)

收稿日期:2002-10-21

通讯作者:张颖

作者简介:陈志武(1975-),男,江西新余人,在读博士,1997 年于西南交通大学获工学硕士学位,现在厦门大学材料系,从事铁电陶瓷材料的研究。

## 2.4 掺杂元素

人们对掺杂元素对薄膜材料疲劳特性的影响进行了广泛的研究。对于单元施主元素而言,如掺入 Nb 元素,人们得到截然不同的结果。Griswold<sup>[13]</sup>等人认为,随着 Nb 元素掺入量的增加,铁电薄膜的抗疲劳性能得到了增强。Aoki<sup>[14]</sup>等人得到的结果却与之相反,他们认为掺入 Nb 元素后降低了薄膜的抗疲劳性能。Ryder<sup>[15]</sup>得到的结果却表明掺入 Nb 元素对铁电薄膜的抗疲劳性能没有影响。掺入受主元素,如 Na、Mg 和 Fe<sup>[16]</sup>或同时掺入施主元素(Nb, Ta)和受主元素(Mg, Fe)都可以提高薄膜的抗疲劳性能。

## 2.5 温度的影响

对采用不同方法制备 Pt/PZT/Pt 体系(如用化学溶液沉积法<sup>[9]</sup>和金属有机化学气相沉积法<sup>[17]</sup>),人们研究了温度对其电疲劳的影响。Mihara<sup>[9]</sup>等人认为随着温度的升高,铁电薄膜的抗疲劳性能得到加强,然而 Brennan<sup>[18]</sup>等人却得到与之相反的结果。

## 3 铁电薄膜电疲劳机理

通过对铁电薄膜电疲劳现象广泛而深入的研究,人们陆续提出了各种不同的模型,这些模型的基本框架都是由以下两部分所构成<sup>[8,19-22]</sup>:(1)在交变电场作用下,缺陷的产生和重新分布;(2)由于缺陷存在,影响了铁电薄膜的极化反转,从而产生电疲劳。研究者认为,一个完善的电疲劳模型应能够很好地解决如下问题:缺陷是什么?它们产生和再分布的机理是什么?它们又是怎样去影响极化反转的?但是由于铁电薄膜电疲劳的复杂性,直到目前为止,研究人员还没有找到一个完善的模型去回答上述所有问题。

引起铁电薄膜极化强度降低的原因有 3 种,我们必须注意区分这 3 种可能的情况:(1)由于铁电薄膜上的有效电极面积减小而造成极化强度测量值的降低;(2)作用于铁电薄膜上的电场强度降低,造成极化强度测量值的降低;(3)电畴反转能力自身的下降。根据这 3 种情况,研究人员分别提出了如下电疲劳机制。

### 3.1 有效电极面积的减小

由于制备电极工艺的不完善,使部分电极发生氧化或电极面与铁电薄膜接触较差,在交流电场循环作用下,电极逐渐产生剥离。而这部分剥离的电极所起的作用已经丧失,也就是说铁电薄膜上的有效电极面积随电场循环次数的增加而逐渐减小,于是使加在铁电畴上并力图使其反转的电场的面积逐渐减小,这可以等同于参与极化反转的铁电薄膜的面积减小了,从而使整体极化强度降低。在铁电薄膜电疲劳过程中,通过测量其几项参数将很容易的辨别出这种机制,这是因为如果是这种疲劳机制起主导作用的话,那么电滞回线上的所有参数如  $P_r$ 、 $P_{\max}$  以及小信号介电常数,电导都将呈相同趋势下降。Johnson<sup>[20]</sup>对用化学沉积和溅射方法制备的 PZT 铁电薄膜电容器进行了研究,通过分析其电导、介电常数和  $P_r$  之间的关系,证实确实存在电疲劳的电极剥离机制。Colla<sup>[17]</sup>通过对用金属有机化学气相沉积法制得的铁电薄膜进行了研究,得到相似的结论。但我们应该强调的是,这种机制虽然是引起铁电薄膜电疲劳的可能原因之一,但对于具有高质量制备的电极的铁电薄膜而言,将不存

在这种疲劳机制。

### 3.2 有效电场强度的降低

在外加交流电场循环作用下,空间电荷将从电极注入铁电薄膜中<sup>[9,23]</sup>并在电极/铁电薄膜界面上逐渐累积,于是在电极与薄膜的交界处,形成一个近电极低介电常数或不可反转层<sup>[23]</sup>。由于这一层状区域的存在,使作用于铁电薄膜电畴上的有效电场强度降低。此时,铁电体薄膜上实际承受的电场强度  $E_t$ <sup>[23]</sup>为:

$$E_t = E - \frac{d}{dL} P \quad (1)$$

式中  $E$  为施加的电场,  $L$ 、 $d$ 、 $d$ 、 $P$  分别为薄膜厚度、近电极低介电常数层的厚度、它的介电常数和铁电薄膜的极化强度(上述关系式在  $d/L \ll 1$  时成立)。电场循环次数越大,  $E_t$  将越来越小,极化强度也就越来越小,产生电疲劳。如果这种电疲劳机制起主导作用的话,那么铁电薄膜的电疲劳将表现为其电滞回线强烈的倾斜,但同时其矫顽电场却不受影响或稍微有所减小。这个电疲劳机制的缺陷在于它没有考虑在高电场作用下,空间电荷可能穿过近电极低介电常数层而注入到薄膜中,而注入的空间电荷在极化反转中将起重要的作用<sup>[23]</sup>。

### 3.3 极化反转能力自身的改变

在交流电场循环作用下,铁电薄膜中电畴自身的反转能力下降也将直接导致电疲劳。电畴反转可分为两步<sup>[11]</sup>:(1)新畴的成核;(2)畴的长大。对于一个无任何缺陷的典型 PZT 铁电薄膜而言,在室温和在 100kV/cm 的交流电场作用下,其新畴成核几乎是不可能的。这是因为铁电畴的成核需要很高的激活能,这个能量大约为  $10^3 k T$ <sup>[24]</sup> ( $k$  是玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度)。在实际铁电薄膜材料中,新畴通常在缺陷处以及残存的与极化方向相反的电畴上成核,因为在这两个区域的成核激活能较低,而这两个区域也同时也将成为反转籽畴成核位置的有利位置<sup>[44]</sup>。如果抑制了反转籽畴的长大也将使极化反转能力下降。

通过研究,人们业已提出 3 种电疲劳机制去阐明由于电畴极化反转自身能力下降而引起铁电薄膜的电疲劳。

#### 3.3.1 畴壁钉扎机制

Warren<sup>[21]</sup>等人提出了电畴壁钉扎机制:电畴壁被钉扎,移动能力下降,引发电疲劳。他们认为,这种钉扎作用是由于电畴壁上的束缚电荷与铁电薄膜中游离的载流子相互作用而造成:为了保持电畴壁的电中性,在电场循环作用下,空间电荷将逐渐被束缚在畴壁上,而这些电荷在畴壁(例如 180°畴壁)上并不是严格的平行于电畴的极化方向,于是这些束缚电荷将与游离的载流子之间发生静电藕合作用,形成一个电中性的复合体:畴壁+补偿电荷。如果这个复合体中的载流子被牢牢的固定住,那么电畴壁也将无法移动(如图 3(b)所示)。电畴壁钉扎机制关键之处在于自由的载流子向畴壁上的束缚电荷定向移动,而这个过程是需要时间的,因此,如果电畴反转一次的时间越长,则足够的时间可让载流子向畴壁移动,钉扎将越严重,引发的电疲劳也将越严重。此外,如果是由畴壁钉扎机制造成电疲劳,材料中必然含有大量的不可移动的电畴壁。这些畴壁虽不能移动,但仍然对小信号介电常数,瑞利(Rayleigh)常数有影响,那么,随着电疲劳的加剧,不可移动的电畴壁越来越多,小信号介电常数和瑞利常数也将越来越大。Colla<sup>[19]</sup>等人对用化学

溶液沉积方法制备的 1400nm 厚的 PZT 薄膜进行了电疲劳实验,其采用了两种电压:低频(1.7mHz)三角波和 30kHz 的方波。他们发现当采用低频电压时,电疲劳速率越快,同时伴随着介电常数的增大,而采用高频时,电疲劳较慢,介电常数反而有稍微的下降,如图 4(a) 所示。Taylor<sup>[25]</sup>等人作了类似的实验,他们发现只有采用低频电压时,薄膜的才随着电循环次数的增加而逐渐加大,如图 4(b) 所示。他们认为当采用低频电压时,薄膜的电疲劳是由电畴钉扎机制所主导的,而采用高频电压时其电疲劳则是由下文中的反转畴抑制机制所主导。



图 3 极化反转自身能力下降而造成电疲劳的两种机制

Fig 3 Two scenarios of fatigue via modification of the switching process

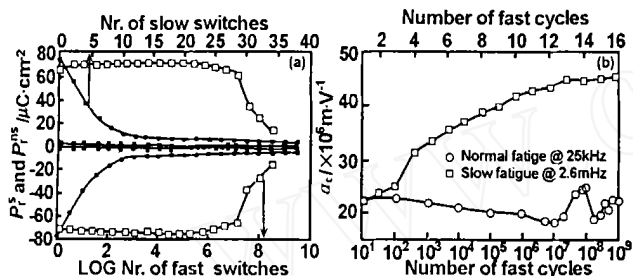


图 4 (a) 采用 (1.7mHz) 低频电压时,电疲劳速率越快,而采用 30kHz 高频电压时,电疲劳较慢 (b) 采用低频电压时,薄膜的才随着电循环次数的增加而逐渐加大

Fig 4 (a) In the slow cycling case (1.7mHz), the polarization degradation is fast, while in the case of high frequency cycling (30kHz), the polarization degradation is slow (b) increases during cycling only in the case of very slow cycling

### 3.3.2 反转畴抑制机制

此机制由 Colla<sup>[22]</sup>等人提出,由以下几点构成:

(1) 铁电薄膜被分成许多独立的反转区,也就是说在每个区域,畴的反转是依靠该区域中有限的反转畴所完成的。

(2) 对每一个独立区域而言,如果其中的反转畴成核过程被抑制在萌芽状态,则这个区域将丧失其反转能力,如图 3(c) 所示。

(3) 反转畴将固定在电极/铁电薄膜界面上成核,这是因为如下原因所造成的:首先,界面处的缺陷密度较大,并且由于电极的粗糙不平,而这都将成为反转畴成核的有利位置。其次,由于内在电场  $E_{bi}$  (built-in electric field) 的存在,使得电极附近的电场强度不同于外加电场强度  $E$ 。在一个电极附近,电场强度等于  $E + E_{bi}$ ,而在另一电极附近其等于  $E - E_{bi}$ <sup>[26]</sup> ( $E_{bi}$  的出现是由于铁电薄膜与空间电荷发生电化学反应所致)。于是在交流电场循环作用下,电场强度等于  $E + E_{bi}$  的那个电极附近区域将是最有利反转畴成核的位置。

(4) 缺陷在交流电场作用下在电极/铁电薄膜界面处累积,将反转畴抑制在其萌芽状态,从而产生疲劳,缺陷的产生

或来自于电极注入,或来自于铁电薄膜中(薄膜在电场作用下,其内部缺陷发生电迁移)。

反转畴抑制机制一个特点是疲劳薄膜被分割成许多大的单畴凝结区。这个区域已被 Colla<sup>[27]</sup>用扫描力显微镜 (SFM) 观测到。

### 3.3.3 局部疲劳机制

这个机制由 Grossmann<sup>[28]</sup>等人提出,其关键之处在于电场循环加载作用下,电极上的屏蔽电荷有一部分将逐渐迁移到铁电薄膜内部中并被其俘获。当这个区域俘获的屏蔽电荷足够多时,畴壁的移动和反转畴的成核都将被显著的抑制,也就是说由于极化束缚电荷与俘获的屏蔽电荷的静电引力,使铁电畴被钉扎,从而造成电疲劳。

以上我们所讨论的机制中,除了有效电极面积减小这个机制以外,其它几种机制都牵涉到缺陷。有效电场强度降低和反转畴抑制机制都认为因缺陷在电极/界面处累积而导致电疲劳,而对于畴壁钉扎机制而言,其认为电疲劳是由于缺陷分散在畴壁所致。有两种方式能够造成缺陷密度的改变:(1) 现有缺陷的重新分布<sup>[29]</sup>; (2) 从电极注入空间电荷而造成新的缺陷<sup>[9,23]</sup>。

氧空位是铁电薄膜材料(如 PZT 铁电薄膜)中所固有的一种很活跃的离子缺陷,以上机制中凡是牵涉到现有缺陷的再分布,通常都包含有氧空位的再分布<sup>[29]</sup>。目前,当分析电疲劳的起因时,人们通常提出“氧空位假设”。这个假设意味着:首先,氧空位浓度的增加对极化反转是有害的,其次,在交流电场作用下氧空位将重新分布。对于“氧空位假设”,赞成者有之,反对者也有之。目前对氧空位假设有利的证据有如下几点:(1) 对于 PZT 系薄膜而言,氧空位是其固有的一种很活跃的离子缺陷。(2) 已有研究者报道,加入能降低氧空位的施主元素后,确实提高了铁电薄膜的抗疲劳性能<sup>[13]</sup>。(3) 由于氧化物电极能够消除或降低氧空位的浓度,那么使用氧化物电极将提高铁电薄膜的抗疲劳性能,这也被研究人员证实<sup>[2~5]</sup>。(4) Scott<sup>[11]</sup>等人在薄膜电疲劳过程中确实检测到了氧空位的再分布现象。

然而反对者却认为:(1) 已有报道,加入能降低氧空位的施主元素后反而降低了薄膜的抗疲劳性能<sup>[14]</sup>或对铁电薄膜的抗疲劳性能没有影响<sup>[15]</sup>。(2) 加入能提高氧空位浓度的受主元素如 Na、Mg 和 Fe<sup>[16]</sup>反而提高了薄膜的抗疲劳性能。(3) 如果交流电场能够促进氧空位的再分布并引发电疲劳的话,那么氧空位扩散再分布的时间越长,电疲劳越严重,也就是说,电压频率越低,疲劳越严重。但 Pawlaczyk<sup>[8]</sup>等人研究却发现,对于 Pt/PZT/Pt 而言,电场频率对疲劳性能却没有影响。

从电极流入薄膜中的空间电荷被俘获,能动性降低,形成一种简单的电荷缺陷,而注入的高能量载流子能够形成更复杂的缺陷,正是由于这些缺陷才造成铁电薄膜的电疲劳,这些缺陷可形成不可反转的近电极低介电常数层,抑制反转畴核的长大、钉扎畴壁、并造成薄膜局部电畴钉扎,许多研究者<sup>[9,23]</sup>都提出正是因为电荷的注入而造成铁电薄膜电疲劳的。

综上所述,对于铁电薄膜的疲劳机制,人们已经有了一定的认识,但何种疲劳机制起主导作用还有待进一步研究。实际铁电薄膜的电疲劳过程十分复杂,通常是几种机制共同存在,共同起作用。按照“缺陷影响极化反转”总结的电疲劳机制如图 5 所



- 5517.
- [7] Araujo C A. [J]. Ferroelectricity Newsletter, 1994, 2:2.
- [8] Pawlaczyk C, Tagantsev A K, Brooks K, et al. [J]. Integer Ferroelectr, 1995, 8:293.
- [9] Mihara T, Watanabe H, Araujo C A. [J]. Jpn J Appl Phys, 1994, 33:3996.
- [10] Ramesh R, Chan W K, Wilkens B, et al. [J]. Integr Ferroelectr, 1992, 1:1.
- [11] Haertling G H. [J]. Integr Ferroelectr, 1997, 14:219.
- [12] Zhu J, Zhang X, Zhu Y, et al. [J]. J Appl Phys, 1998, 83:1610.
- [13] Griswold E M, Sayer M, Amm D T, et al. [J]. Can J Phys, 1991, 69:260.
- [14] Aoki K, Fukuda Y. [J]. Jpn J Appl Phys, 1997, 36:1195.
- [15] Ryder D F, Raman N K. [J]. J Electron Mater, 1992, 21:971.
- [16] Klissurska R D, Brooks K G, Setter N. [J]. Ferroelectrics, 1999, 225:171.
- [17] Colla E L, Tagantsev A K, Taylor D V, et al. [J]. J Korean Phys Soc, 1998, 32:1353.
- [18] Brennan C J, Parrella R D, Larsen D E. [J]. Ferroelectrics, 1994, 151:33.
- [19] Colla E L, Taylor D V, Tagantsev A K, et al. [J]. Appl Phys Lett, 1998, 72:2478.
- [20] Johnson D J, Amm D T, Griswold E, et al. [J]. Mater Res Soc Symp Proc, 1990, 200:289.
- [21] Warren W L, Dimos D, Tuttle B A, et al. [J]. J Appl Phys, 1995, 77:6695.
- [22] Colla E L, Tagantsev A K, Taylor D V, et al. [J]. Integr Ferroelectr, 1997, 18:19.
- [23] Tagantsev A K, Stolichnov L A. [J]. Appl Phys Lett, 1999, 74:1326.
- [24] Tagantsev A K. [J]. Ferroelectrics, 1996, 184:79.
- [25] Taylor D V, Damjanovic D, Colla E, et al. [J]. Ferroelectrics, 1999, 225:91.
- [26] Tagantsev A K, Pawlaczyk C, Brooks K, et al. [J]. Integr Ferroelectr, 1994, 4:1.
- [27] Colla E L, Hong S, Taylor D V, et al. [J]. Appl Phys Lett, 1998, 72:2763.
- [28] Grossmann M, Lohse O, Bolten D, et al. [J]. Appl Phys Lett, 2000, 76:363.
- [29] Dawber M, Scott J F. [J]. Appl Phys Lett, 2000, 76:1060.
- [30] Scott J F, Pouligny B. [J]. J Appl Phys, 1988, 64:1547.

## Recent progress on the electric fatigue of ferroelectric thin films

CHEN Zhi-wu<sup>1</sup>, CHENG Xuan<sup>2</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>

(1. Dept. of Mater Sci. and Eng., Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Dept. of Chem, State Key Lab for Phys. Chem. of Solid Surfaces, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The main hindrance to commercial applications of ferroelectric thin films due to their electric fatigue problems under ac electric fields has been well recognized. Significant researches have been carried out in an effort to understand the electric fatigue behavior and failure mechanism of ferroelectric thin films. In this paper, recent progress on the electric fatigue of ferroelectric thin films was briefly reviewed in terms of the factors that influence the fatigue behavior, the mechanism by which the ferroelectric thin films failed due to electric loading and the ways through which the fatigue was mitigated. Possible solutions to reduce or minimize the electric fatigue of ferroelectric thin films were also summarized.

**Key words:** ferroelectric thin film; electric fatigue; domain switching

(上接第 499 页)

- [22] Zeng Z M, et al. [J]. Vac Sci Technol, 1999, B17:851.
- [23] Baba K, et al. [J]. Surf Coat Technol, 2000, 129:112.
- [24] Veerabadran K M, et al. [J]. Mater Sci, 1999, Forum320:561.
- [25] Sundararajan T, et al. [J]. Mater Eng Perform, 1999, 8:252.
- [26] Tian X B, et al. [J]. Scr Mater, 2000, 43:417.
- [27] Chabica M E, et al. [J]. Surf Coat Technol, 1992, 51:24.
- [28] Hannani A, et al. [J]. Trans Inst Met Finish, 1998, 76(3):114.
- [29] Smith P, et al. [J]. Vac Sci Technol, 1994, B12:940.
- [30] Blawert C, et al. [J]. Surf Coat Technol, 1996, 85:15.
- [31] Chen J, et al. [J]. Mater Process Technol, 1995, 49:115.
- [32] Cooney E C, et al. [J]. Corros Sci, 1993, 34:2007.
- [33] Demaree J D, et al. [J]. Electrochem Sci, 1993, 140:331.
- [34] Windisch C F, et al. [J]. Electrochem Sci, 1999, 146:984.
- [35] Sabat R, et al. [J]. Corros Sci, 1992, 33:121.

## Ion implantation techniques & effect of ion implantation on corrosion electrochemical behavior of stainless

LI Qing<sup>1,2</sup>

(1. Chongqing Instrument Material Research Institute, Chongqing 400700, China;

2. National Instrument Functional Materials Engineering Technology Research Center, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** Ion implantation and its related processes were powerful techniques for modifying the surface composition and accordingly, the surface properties of metals. Research on the effect of ion implantation on the corrosion behavior of metals has now been carried out of about thirty years. This paper reviews research done on the corrosion or electrochemical behavior of ion-implanted stainless steels. The effect of over ten different implanted elements was reviewed.

**Key words:** ion beam mixing; ion implantation; localized corrosion; pitting; stainless steel